

УДК 539.4 : 622.276

ОЦІНКА ПОШКОДЖУЮЧОЇ ДІЇ АСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЕЛЕМЕНТИ БУРИЛЬНИХ І ШТАНГОВИХ КОЛОН

В.І.Артим

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 4-20-02,
e-mail: viarty@rambler.ru

Для приведення характерних для бурильних і штангових колон асиметричних циклів напружень низького рівня до симетричних запропоновано рівняння, які більш точно враховують чутливість до асиметрії циклів та зниження границі витривалості в процесі експлуатації і дають змогу приводити до симетричного циклу усі низькі напруження, не відкидаючи їх із розгляду. Представлено приклади використання розроблених рівнянь.

Ключові слова: асиметричний цикл, низькоамплітудне навантаження, корозійна втома, довговічність

Для приведения характерных для бурильных и штанговых колонн асимметрических циклов напряжений низкого уровня к симметричным предложены уравнения, которые более точно учитывают чувствительность к асимметрии циклов и снижение границы выносливости при эксплуатации и позволяют приводить к симметричному циклу все низкие напряжения, не отбрасывая их из рассмотрения. Представлены примеры использования разработанных уравнений.

Ключевые слова: асимметрический цикл, низкоамплитудная нагрузка, коррозионная усталость, долговечность

The papers presents the reduction analyzes results of asymmetric stresses that are near corresponded fatigue limit. Proposed method permits to reduce to symmetric circles all low stresses and don't throw away them. Also there are examples that illustrated using of this method.

Keywords: asymmetric cycle, low peak offloading, corrosion fatigue, longevity

Як відомо, процеси навантажування бурильних і штангових колон характеризуються великим розкидом асиметрії циклів напруження як за своєю довжиною, так і в часі. У такому випадку під час розрахунку корозійно-втомної довговічності елементів колон ми зіткнемося з проблемою оцінки пошкоджуючої дії циклів напруження за асиметричного навантажування з великим розкидом коефіцієнта асиметрії. У зв'язку з тим, що переважну більшість експериментів з визначення параметрів опору втомі проводять за симетричного циклу напружень, необхідним етапом розрахунків довговічності елементів колон є приведення асиметричних циклів до еквівалентних за пошкоджуючою дією симетричних.

Розрахунок довговічності проводимо за розробленим чотирипараметричним рівнянням кривої корозійної втоми [1]. Для верхньої гілки кривої корозійної втоми використовуємо рівняння [2]

$$N = \frac{Q}{\sigma_{\max}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{\max} - \bar{\sigma}_{rR}}{V_R} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (1)$$

де: N – кількість циклів до руйнування деталей;

$\bar{\sigma}_{rR}$ – частинне значення границі витривалості, що відповідає ймовірності неруйнування r ;

σ_{\max} – максимальне напруження циклу регулярного навантаження з постійним значенням

коефіцієнта асиметрії $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$;

V_R – параметр з розмірністю напруження;

$Q = N_0 \cdot \bar{\sigma}_{rR}$ – коефіцієнт витривалості;

N_0 – параметр, який характеризує кількість циклів до точки нижнього перегину кривої втоми.

Для нижньої гілки кривої корозійної втоми використовуємо рівняння

$$N_{cor} = \frac{Q_{cor}}{\sigma} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma}{V_{cor}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (2)$$

де Q_{cor} , V_{cor} – параметри нижньої гілки кривої корозійної втоми.

Узгодження гілок (1) і (2) проводиться за системою рівнянь

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_r + k \\ N = N_{cor} \\ N' = N'_{cor} \end{cases}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт узгодження з експериментальними даними, МПа.

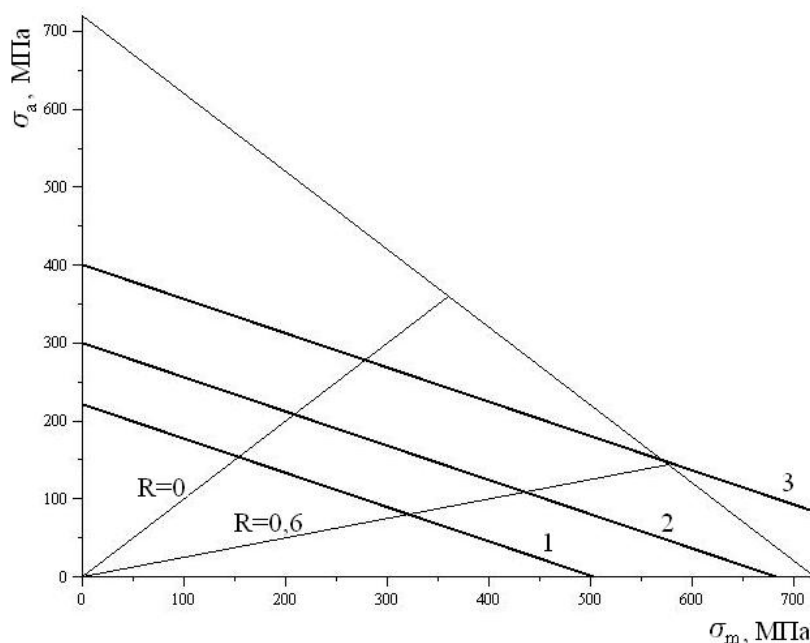
Під час розрахунку довговічності за рівнянням (1) для приведення асиметричних напружень σ_{\max} з $-1 \leq R < 1$ до симетричного циклу з σ_{ekv} рекомендується використання рівняння [2]

$$\sigma_{ekv} = b \sigma_{\max} - (ab - 1) \sigma_{-1}, \quad (4)$$

де: σ_{-1} – границя витривалості за симетричного навантаження;

a і b – коефіцієнти приведення

$$a = \frac{2}{2 - (1 - \psi)(1 + R)}, \quad b = \left(\frac{V_0}{V_{-1}} (1 + R) - R \right)^{-1}, \quad (5)$$



1 – лінія рівної пошкодженості на рівні границі витривалості;
2 – лінія рівної пошкодженості за багатоциклової втоми;
3 – лінія рівної пошкодженості за малоциклової втоми

Рисунок 1 – Діаграма Хейя з лініями рівної пошкоджуваності для зразків, виготовлених з матеріалу бурильних замків

де: $\psi = \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_0} - 1$ – коефіцієнт чутливості до асиметрії навантаження;

σ_0 – границя витривалості за віднульового навантаження;

V_0, V_{-1} – характеристика нахилу лівої гілки кривої втоми в півлогарифмічній системі координат відповідно за віднульового і симетричного навантаження.

Проведено аналіз можливості використання рівняння (4) для приведення до еквівалентних симетричних циклів асиметричних циклів процесів навантажування елементів бурильних і штангових колон. Для такого аналізу використано лінії рівної пошкоджуваності, побудовані на діаграмі Хейя для циклів з додатнім середнім напруженням (рис. 1).

На діаграмі Хейя лінія, яка описує цикли з $R = \text{const}$, визначається з рівняння

$$y = \frac{1-R}{1+R} x. \quad (6)$$

За $R=1$ – це є вісь абсцис, за $R=-1$ – вісь ординат, а за $R=0$ – промінь $y=x$.

Лінії рівної пошкоджуваності побудовано згідно з рівнянням (4) за даними [3] для зразків зі сталі 40ХН, яка є матеріалом замків бурильних труб. Лінія 1 відповідає рівню границі витривалості зразків, 2 – області багатоциклової втоми, 3 – малоциклової. Як бачимо з рис. 1, для високоасиметричних циклів з коефіцієнтом асиметрії 0,6 і вище, які є характерними для навантаження верхньої частини бурильних і штангових колон, лінії рівної пошкодженості входять в протиріччя з фізичною реальною картиною процесу. Так, у жодному випадку лінії 1,

2 не можуть перетинати вісь абсцис. Це означало б, що за деякого визначеного рівня середнього напруження втомне руйнування відбудеться за визначену кількість циклів з безмежно малими амплітудами, що ніколи не відбувається на практиці. Лінія 3 також не має фізичного змісту, тому що вихід за межі діаграми означає якусь визначену кількість циклів до руйнування для зразків, які повинні миттєво зруйнуватися через напруження, вищі за границю міцності.

Отже, необхідним є відповідне корегування рівняння (4) на випадок приведення асиметричних циклів напружень з високою асиметрією. Для такого корегування в області багатоциклової втоми раніше нами було розроблено відповідні рівняння приведення [4].

Так, для приведення асиметричних циклів із коефіцієнтом асиметрії $-1 \leq R < 0$ з умови незмінності коефіцієнта ψ від рівня навантаження отримано [4]

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{\max} \left(1 - \frac{(1-\psi)(1+R)}{2} \right). \quad (7)$$

Для приведення асиметричних циклів із $0 \leq R < 1$ отримано залежність [4]

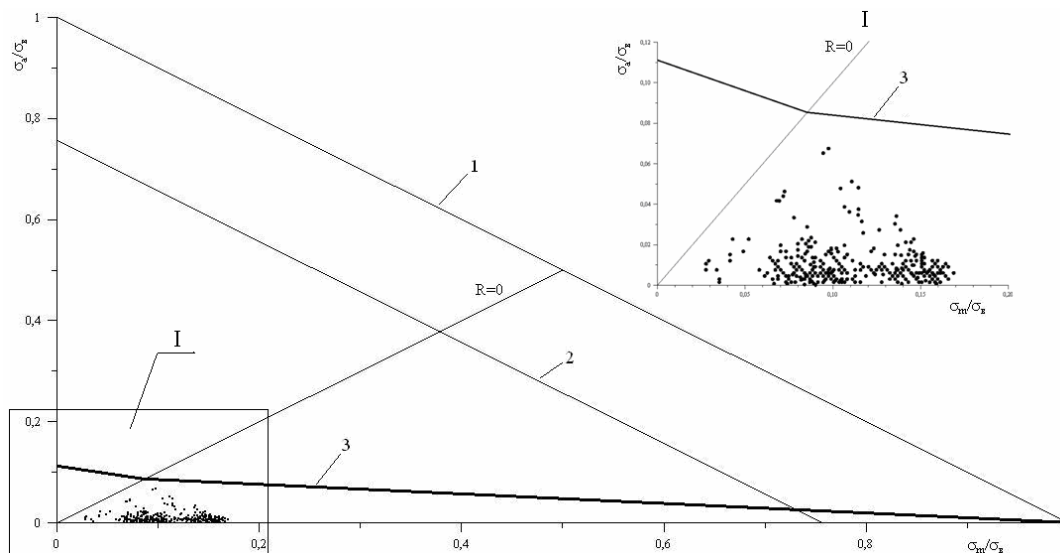
$$\sigma_{ekv} = \sigma_{\epsilon} \psi_1 \frac{1+\psi}{1+\psi_1}, \quad (8)$$

де σ_{ϵ} – границя міцності матеріалу зразка.

Коефіцієнт ψ_1 визначається з рівняння [4]

$$\psi_1 = \frac{\sigma_{\max}(1-R)}{2\sigma_{\epsilon} - \sigma_{\max}(1+R)}. \quad (9)$$

Для обґрунтування можливості використання розроблених рівнянь приведення асимет-



1 – лінія статичного руйнування $\sigma_{\max} = \sigma_y$; 2 – лінія границі плинності $\sigma_{\max} = \sigma_m$; 3 – лінія границі витривалості

Рисунок 2 – Загальний вигляд діаграми Хейя з процесом навантаження колони насосних штанг

ричних циклів стосовно розрахунків довговічності елементів бурильних і штангових колон проведено аналіз отриманих реалізацій експлуатаційного навантажування бурильних і штангових колон за допомогою діаграми Хейя. Схематизацію процесів навантажування проведено за розробленим методом [5].

Так, на рис. 2 наведено загальний вигляд діаграми Хейя з накладеним процесом навантажування колони насосних штанг.

На рис. 3 наведено оброблені процеси навантажування бурильної колони в процесі опускання та за прихоплення під час піднімання.

Слід зауважити, що, крім випадку прихоплення, характерною рисою усіх процесів є відсутність циклів з амплітудами напружень, вищими за відповідну границю витривалості.

Таким чином, проведений аналіз процесів навантажування, які виникають під час експлуатації елементів бурильних і штангових колон, свідчить, що в спектрі напружень чільне місце займають низькоамплітудні напруження з параметрами σ_{\max} , R , які не перевищують відповідної границі витривалості σ_R . У такому випадку необхідно враховувати закономірне зниження границі витривалості в процесі накопичення пошкоджень [2, 6], спричинене дією саме низькоамплітудних циклів напружень. Тому приведення σ_{\max} до σ_{ekv} повинно поширюватися і на цикли напружень, що менші за відповідну границю витривалості. Це ще раз вказує на особливу важливість розроблення уточнених методів приведення низькоамплітудних циклів навантажування для оцінки довговічності бурильних і штангових колон.

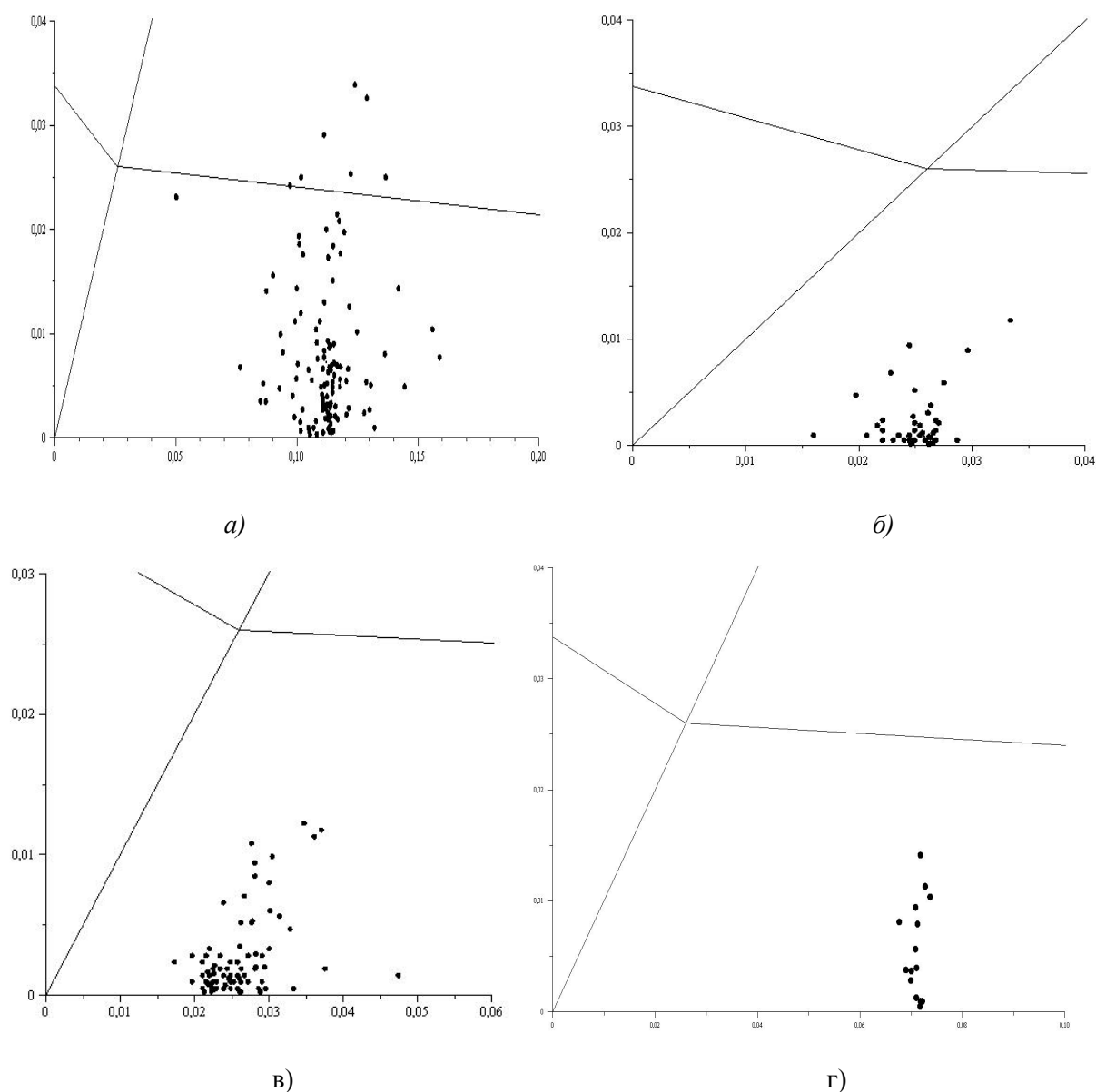
Використання рівняння (4) для приведення $\sigma_{\max} < \sigma_R$ має суттєве обмеження, а саме: за умови $\sigma_{\max} < \sigma_R - \sigma_{-1}$ приведенне напруження

σ_{ekv} стає меншим 0. У такому випадку рекомендується відкидати це напруження з розгляду як таке, що не вносить пошкоджуючої дії [2]. Але неврахування низьких напружень за звичайних умов роботи (низькоамплітудне навантаження) елементів бурильних та штангових колон буде мати значний вплив на їх корозійновтомну довговічність. Слід зауважити, що відкидання низьких напружень призведе до завищення розрахункової довговічності. Це є небезпечним з точки зору забезпечення надійності колон. Виведені ж нами раніше рівняння (7-9) не повною мірою враховують специфіку навантажування елементів бурильних і штангових колон.

Тому метою роботи є розроблення рівнянь приведення асиметричних циклів напружень бурильних і штангових колон до симетричного циклу з урахуванням особливостей їх навантажування.

Для розроблення такого уточненого методу ми керувалися закономірностями корозійновтомного пошкодження й особливостями побудови ліній однакової пошкоженості на діаграмі Хейя.

Так, зменшення рівня навантаженості нижче границі витривалості зменшує чутливість до асиметрії навантаження. Накопичення пошкоджень відбувається переважно за дислокаційним механізмом, де основним чинником є амплітуда напруження. Ефект Баушінгера, який і призводить до зміни коефіцієнта чутливості до асиметрії циклу навантаження за переходу до виключно розтягуючого навантаження, на цій стадії працює не повністю. Але накопичення корозійновтомного пошкодження супроводжується зменшенням кінетичної границі витривалості, що призводить до інтенсифікації процесу і поступового збільшення чутливості



*а – прихоплення за довжини колони 500 м;
б – опускання за довжини колони 190 м;
в – опускання за довжини колони 500 м;
г – опускання за довжини колони 1970 м*

Рисунок 3 – Діаграми Хейя з процесом навантаження бурильної колони під час спуско-піднімальних операцій:

до асиметрії циклу до рівня, характерного для області багатоциклової втоми. Таким чином, для циклів напружень, нижчих за границю витривалості, можна прийняти модель лінійного зменшення коефіцієнта чутливості до асиметрії циклу напруження залежно від рівня навантаження. Правомірність такої моделі підтверджується і тим, що за низьких амплітуд напружень лінія рівної пошкодженості на діаграмі Хейя повинна вироджуватися в вісь абсцис.

Як відомо, елементи бурильної колони досить часто підлягають дії асиметричних циклів напружень з високими амплітудами, навіть до рівня границі плинності, наприклад, під час ліквідації прихоплення [3]. Навіть невелику кіль-

кість таких циклів напружень необхідно врахувати за розрахунку довговічності. Для таких циклів напружень, на відміну від низькоамплітудного навантаження, навпаки, спостерігається підвищена чутливість до асиметрії. Рівень пошкодження, в першу чергу, контролюється максимальним напруженням циклу. З діаграми Хейя видно, що коефіцієнт чутливості до асиметрії для високого рівня навантаження збільшується аж до одиниці за однократного руйнування.

Таким чином, за оцінки пошкоджуючого впливу асиметричних циклів навантаження на елементи бурильних і штангових колон слід розрізняти три області: низькоамплітудну, високоамплітудну і область звичайної багатоцик-

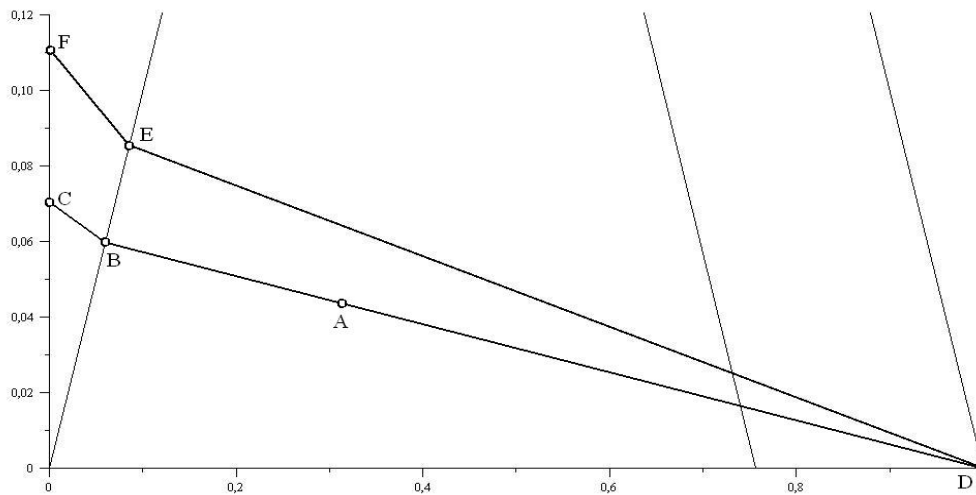


Рисунок 4 – Схема приведення низькоамплітудного асиметричного циклу з коефіцієнтом асиметрії $R \geq 0$

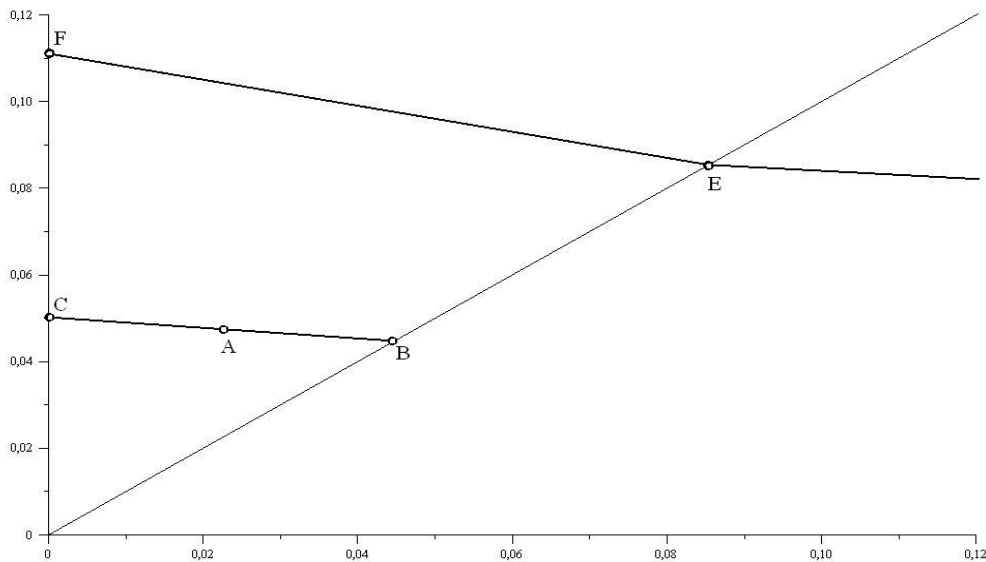


Рисунок 5 – Схема приведення низькоамплітудного асиметричного циклу з коефіцієнтом асиметрії $-1 < R < 0$

лової корозійної втоми. Для звичайних циклів напружень, наприклад, на рис. 3 а – вище лінії границі витривалості, рекомендується використання рівнянь (7) для циклів з $-1 < R \leq 0$ і (8), (9) – для $R > 0$.

Виведемо відповідні рівняння для двох інших областей.

Нехай потрібно привести до еквівалентного симетричного циклу низькоамплітудний асиметричний цикл з коефіцієнтом асиметрії $R \geq 0$ (точка А на рис. 4).

На рисунку лінія FED – лінія границі витривалості. Для приведення до віднульового циклу використовуємо рівняння (8). Подальше приведення проводимо з умови лінійного зменшення коефіцієнта чутливості до асиметрії циклу ψ_B залежно від рівня навантаження

$$\psi_B = \psi \cdot \frac{OB}{OE} = \psi \cdot \frac{\sigma_{\max}(B)}{\sigma_0} = \psi \cdot (1 + \psi) \cdot \frac{\sigma_e}{\sigma_{-1}} \cdot \frac{\psi_1}{1 + \psi_1}. \quad (10)$$

Враховуючи геометричний зміст коефіцієнта чутливості до асиметрії циклу на діаграмі Хейя, отримаємо

$$\psi_B = -\frac{y(C) - y(B)}{x(C) - x(B)} = \frac{\sigma_{ekv} - 0,5\sigma_{\max}(B)}{0,5\sigma_{\max}(B)}. \quad (11)$$

Звідси отримуємо остаточне рівняння

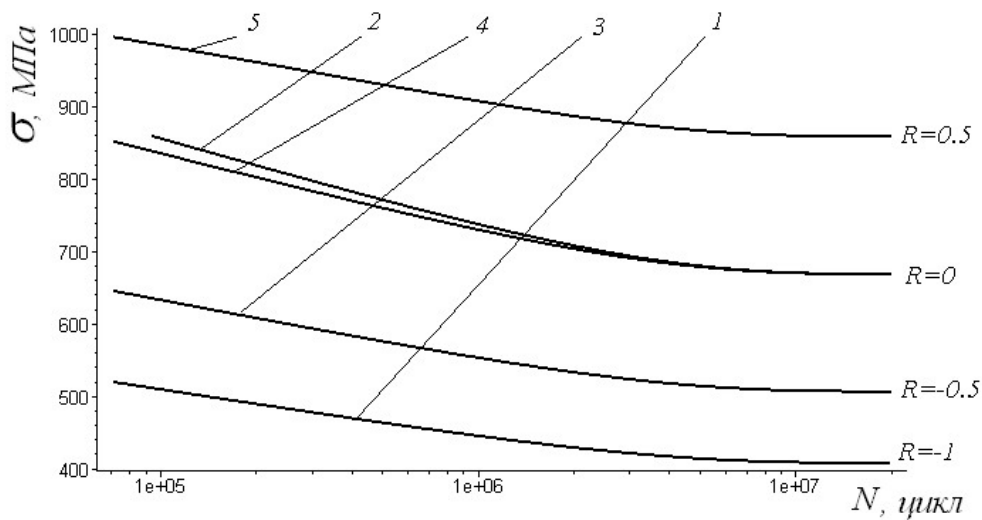
$$\sigma_{ekv} = \sigma_e \psi_1 \frac{1 + \psi_B}{1 + \psi_1}, \quad (12)$$

де ψ_1 визначається з рівняння (9), а ψ_B – з (10).

Нехай потрібно привести до еквівалентного симетричного циклу низькоамплітудний асиметричний цикл з коефіцієнтом асиметрії $-1 < R < 0$ (точка А на рис. 5).

У такому випадку

$$\psi_B = -\frac{y(A) - y(B)}{x(A) - x(B)} = \psi \frac{x(B)}{x(E)}. \quad (13)$$



1 – експериментальна за симетричного навантажування;
2 – експериментальна за віднульового навантажування;
3 – приведена за рівнянням (7) ($R=0$);
4 – приведена за рівнянням (7) ($R=-0,5$);
5 – приведена за рівнянням (8) ($R=0,5$)

Рисунок 6 – Криві втоми для зразків зі сталі 40ХН

Прийmemo, що $\psi \frac{x(B)}{x(E)} = k \cdot x(B)$. Враховуючи, що $x(B) = y(B)$, отримуємо квадратне рівняння з невідомим $x(B)$. Розв'язок рівняння має вигляд

$$x(B) = \frac{k \cdot x(A) - 1 \pm \sqrt{[1 - k \cdot x(A)]^2 - 4k \cdot y(A)}}{2k}. \quad (14)$$

Аналіз свідчить, що фізичний зміст має розв'язок зі знаком "+".

Враховуючи (11), остаточно отримаємо

$$\sigma_{ekv} = k \cdot x(B) \cdot (1 + x(B)), \quad (15)$$

$$\text{де: } x(B) = \frac{k \cdot x(A) - 1 + \sqrt{[1 - k \cdot x(A)]^2 - 4k \cdot y(A)}}{2k};$$

$$k = \psi \frac{1 + \psi}{\sigma_{-1}};$$

$$x(A) = \sigma_{\max} \frac{1 + R}{2};$$

$$y(A) = \sigma_{\max} \frac{1 - R}{2}.$$

У випадку високоамплітудного навантаження з $\sigma_{\max} \geq \sigma_m$ отримуємо аналогічні рівняння приведення, тільки з різницею у визначенні ψ_B .

Для обґрунтування запропонованого методу щодо побудови асиметричних кривих втоми з коефіцієнтом асиметрії $-1 < R < 1$ об'єктом досліджень вибрано сталь 40ХН, яка використовується як матеріал замкових з'єднань бурових труб. За результатами досліджень для зразків зі сталі 40ХН [7] отримано такі параметри кривих втоми:

$$\sigma_{-1} = 408 \text{ МПа}; V_{-1} = 29,82 \text{ МПа};$$

$$\sigma_0 = 662 \text{ МПа}; V_0 = 54,91 \text{ МПа};$$

$$N_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ цикли}; \psi = 0,22.$$

На рис. 6 наведено криві втоми, побудовані за експериментальними дослідженнями, а також криві, побудовані за рівняннями (7) і (8).

Як бачимо, результати досить тісно корелюють між собою. Це вказує на можливість використання розробленого методу приведення асиметричних циклів напружень до еквівалентних за пошкоджуючою дією і для визначення параметрів кривих втоми за асиметричного навантажування.

Для оцінки достовірності запропонованої методики приведення і для інших відповідальних елементів конструкцій, які працюють в умовах корозійної втоми, було проаналізовано результати [2] експериментального дослідження зразків, виготовлених зі сталі 17Г1С, яка широко використовується для виготовлення магістральних трубопроводів. Отримано такі параметри кривих втоми:

$$\sigma_{-1} = 141,9 \text{ МПа}; V_{-1} = 30,87 \text{ МПа};$$

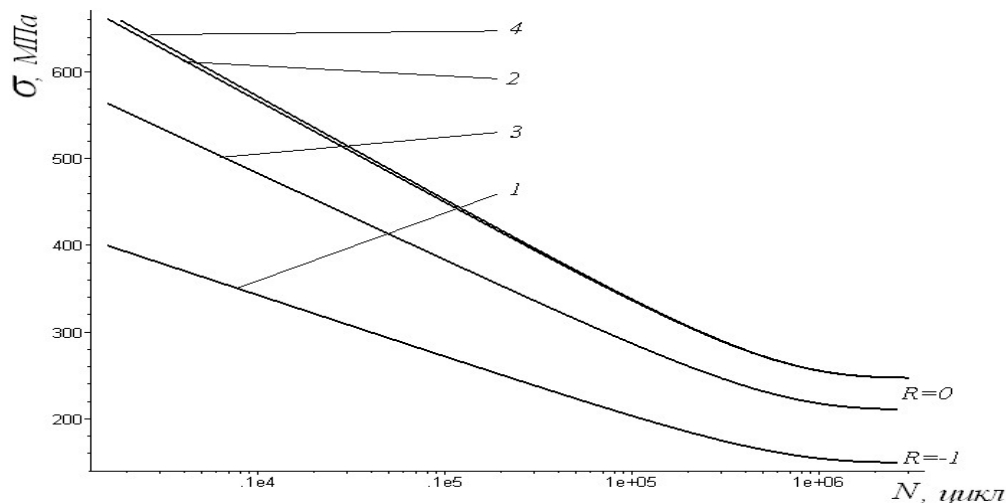
$$\sigma_0 = 247,1 \text{ МПа}; V_0 = 51,83 \text{ МПа};$$

$$N_0 = 5,207 \cdot 10^5; \psi = 0,209.$$

На рис. 7 наведені криві втоми 1 і 2, побудовані згідно з даними параметрами за рівнянням [2]

$$N = N_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_R}{V_R} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (17)$$

а також криві 3 і 4, отримані шляхом приведення з допомогою рівняння Одінга $\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_a}$ [8] і рівняння (7) відповідно.



1 – експериментальна за симетричного навантажування;
2 – експериментальна за віднульового навантажування;
3 – приведена за рівнянням Одінга;
4 – приведена за рівнянням (7)

Рисунок 7 – Криві втоми для зразків зі сталі 17Г1С [4]

Як бачимо, в даному випадку запропонований метод приведення практично повністю відповідає результатам експерименту, на відміну від широко вживаного методу приведення за допомогою рівняння Одінга.

Таким чином, можна зробити висновок, що за допомогою розроблених рівнянь і програмного забезпечення можна будувати криві корозійної втоми з різною асиметрією циклів навантажування і визначати їх параметри з достатньою точністю. Для цього необхідно знати тільки параметри кривої корозійної втоми за симетричного навантажування і коефіцієнт чутливості до асиметрії навантажування.

Це значно зменшує кількість дорогих і довготривалих експериментальних досліджень для оцінювання довговічності елементів бурильних і штангових колон, які працюють в умовах асиметричного навантажування із середнім напруженням розтягу.

Отже, під час аналізу процесу навантажування елементів бурильної і штангової колони на етапі його приведення до еквівалентного симетричного процесу слід враховувати асиметричні напруження спектра навантажування. Таке врахування рекомендується проводити за допомогою розроблених рівнянь, які більш точно враховують чутливість до асиметрії навантажування.

Література

- 1 Артим В. І. Урахування корозійного чинника при оцінці довговічності насосних штанг / В.І.Артим // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 4. – С. 140-143.
- 2 Почтенный Е. К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций / Е. К. Почтенный. – Мн.: УП «Арти-Фекс», 2002. – 186 с.

3 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / під заг. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / під ред. В.І. Похмурського, Є.І. Крижанівського. – Львів - Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.

4 Івасів В. М. Урахування напружень низького рівня при розрахунках довговічності деталей машин / В. М. Івасів, В. І. Артим, П. В. Пушкар та ін. // Машинознавство. – 2003. – № 12. – С. 17-20.

5 Крижанівський Є. І. Схематизація випадкового навантажування методом вкладених циклів / Є. І. Крижанівський, В. М. Івасів, В. І. Артим та ін. // Науковий вісник ІФНТУНГ. Нафтогазопромислове обладнання. – 2002. – № 2. – С.47-54.

6 Артим В. І. Визначення залишкового ресурсу насосних штанг в типових умовах експлуатації / В. І. Артим, В. М. Івасів, Я. Т. Федорович та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 2. – С. 79-82.

7 Івасів В.М. Методи та засоби управління бурильною колоною для забезпечення її надійності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.12 “Машини нафтової та газової промисловості” / В.М.Івасів. – Івано-Франківськ, 1999. – 31 с.

8 Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А.Одинг. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
20.11.09

Рекомендована до друку професором
В.М Івасівим